: https://dx.doi.org/10.22067/jgrd.2023.74275.1098
مقالهٔ پژوهشی-مطالعهٔ موردی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال بیست و یکم، شمارهٔ ۱، بهار ۱٤۰۲، شمارهٔ پیاپی ٤۲

شناسایی عوامل محرک گسترش و رشد آتی محدوده‌های شهری (نمونهٔ موردی: گسترش محدودهٔ شهر زاهدان[1])

عطاالله اکبری (دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران)
ata.akbari1352@gmail.com
محمد اسکندری ثانی (دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، نویسنده مسئول)
meskandarisani@birjand.ac.ir
مرتضی اسماعیل‌نژاد (دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران)
esmailnejad@birjand.ac.ir

صص ۱٤۰ ـ ۱۰۳

چکیده

هدف این پژوهش، ارزیابی و شناسایی روند الگوهای تاریخی رشد شهر، شبیه‌سازی و پیش‌بینی اندازه و نحوه رشد آینده شهر زاهدان است و به دنبال بررسی و شناسایی عوامل مداخله‌گر در تعیین جهت هوشمندانه محدوده‌های شهری است. در این پژوهش قصد پاسخ‌گویی به این سؤال کلیدی است که آیا رشد محدوده شهری زاهدان مطابق با الگوهای تدارک و برنامه‌ریزی شده و همسان با جمعیت است؟ پژوهش حاضر از طریق جمع‌آوری داده‌های اسنادی و تصاویر سنجش‌ازدور ماهواره لندست طی دوره‌های ده‌ساله زمانی از ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ و کاربست مدل SLEUTH-3R برای بررسی روند رشد محدوده شهر در گذشته و پیش‌بینی آینده آن تا سال

۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول مقاله با عنوان «واکاوی عوامل تأثیرگذار در کنترل و هدایت محدوده‌های شهر (نمونه موردمطالعه شهر زاهدان)» است.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۰۹/۲۸ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۰۱/۱۷

۱۴۳۰ و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی ArcGIS و Envi انجام شد. نتایج نشان داد، روند رشد تاریخی شهر زاهدان بیشتر براساس رشد ارگانیک، رشد براساس گرایش به جاده و رشد مناطق شهری به‌صورت لبه‌ای و رشد آتی شهر به‌صورت درونی و سپس در کناره‌های بافت موجود خواهد بود. نتایج رشد آینده شهر زاهدان نشان داد، رشد بیشتر به سمت غرب و بخش‌هایی از جنوب خواهد بود که با در نظر گرفتن مطلوبیت توسعه اراضی در نیمه غربی الگو و میزان رشد محدوده در آینده را منطقی و مناسب می‌کند. نتایج برآوردهای آتی رشد محدوده کالبدی و جمعیتی نشانگر کاهش تراکم جمعیت به میزان ۵۷ نفر در هکتار از ۸۹ نفر در هکتار خواهد بود. این مقدار نشانگر سبقت میزان رشد فیزیکی شهر از رشد جمعیتی آن و به معنای گسترش افقی شهر و پراکنده‌رویی بیش‌ازحد شهر زاهدان است. با توجه به پژوهش انجام شده، بهترین گزینه برای توسعه شهر زاهدان، توسعه درونی یا توسعه میان‌افزا است که در زمین‌های بایر و خالی درون شهر اتفاق می‌افتد.

کلیدواژه‌ها: رشد شهر، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، مدل SLEUTH-3R، شهر زاهدان.

۱. مقدمه

گرایش به شهرنشینی به دلیل افزایش جمعیت در اغلب مناطق جهان به‌شدت در حال گسترش است (کوهن[1]، ۲۰۰۶). براساس گزارش سازمان ملل متحد از سال ۲۰۰۷، بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و پیش‌بینی می‌شود میزان جمعیت شهرنشین جهان تا سال ۲۰۳۰ به ٦۰ درصد برسد (سازمان ملل[2]، ۲۰۲۰). رشد سریع جمعیت، شهرنشینی و پیامدهای ناشی از آن در شهرها، پدیده‌ای انکارناپذیر است؛ چراکه شهرها به پیروی از نقش و موقعیت جدیدی که پیدا کرده‌اند، شکل‌های تازه‌ای از زندگی اجتماعی را بر خود و فضای پیرامونی خویش تحمیل می‌کنند که آثار آن بر آب‌وهوا، محصولات کشاورزی، بهداشت عمومی و عدالت اجتماعی تأثیرگذار است (اسفنده و همکاران، ۱۴۰۰، ص. ۵۳)

1. Cohen
2. United Nations

هنگامی‌که شهرها از نظر اندازه و تعداد جمعیت رشد می‌کنند، توجه به هماهنگی میان جنبه‌های کالبدی، اجتماعی و محیط‌زیستی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است و پایداری شهر درگرو همخوانی میان این عوامل خواهد بود. در این میان، محیط‌زیست به‌عنوان بستر توسعه نقش بسزایی در روند شکل‌گیری شهرها دارد و بهره‌مندی از محیط‌زیست سالم و بوم‌سازگان‌های پایدار، نه‌تنها تأمین‌کننده نهاده‌های لازم در فرایند توسعه است، بلکه فراهم‌کننده محیطی مناسب برای زیستن بشر و شرکت مناسب او در این فرآیند خواهد بود (میرقعی، ۱۳۸۹، ص. ۱۲؛ رسولی و کمیاب، ۱۳۹۵، ص. ۳). همان‌طورکه گفته شد، توسعه شهری و تغییرات الگوی کاربری زمین باعث ایجاد تأثیرات گسترده اجتماعی و محیط‌زیستی می‌شود. این تأثیرات شامل کاهش فضاهای طبیعی، تجمع وسایل نقلیه، کاهش زمین‌های کشاورزی با توان تولید زیاد، تأثیر بر زهکش‌های طبیعی و کاهش کیفیت آب و تغییر اقلیم محلی است؛ بنابراین درک چگونگی تغییرات پوشش و کاربری زمین، چه از نظر کمیت تغییرات و چه از نظر الگوی مکانی آن‌ها به دلیل اثرات گسترده بر محیط‌زیست، چرخه‌های آبی و زیستگاه‌های طبیعی، حیاتی به نظر می‌رسد (کامیاب و همکاران، ۱۳۹۰، ص. ۱۰۰).

شهر زاهدان به‌عنوان بزرگ‌ترین شهر در جنوب شرق ایران، یکی از بی‌قاعده‌ترین روندها در گسترش فیزیکی شهری را طی سه دهه گذشته در ایران داشته است (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۳، ص. ۳). به اذعان کارشناسان اداره اتباع و مهاجرین خارجی شهرستان زاهدان، جمعیت این شهر در حال حاضر به مرز یک میلیون نفر رسیده و به‌طور متوسط سالانه ٦/٦ درصد رشد داشته است. طبق نتایج مرکز آمار ایران (۱۳۹۵) بخش بزرگی از جمعیت شهری آن حاشیه‌نشین است. مساحت محدوده قانونی شهر زاهدان در سال ١٣٨٤ تقریباً ٦٤٦٨/٥ هکتار بوده است که بخش وسیعی از آن به کاربری‌های آموزشی، درمانی، ورزشی و اداری تعلق دارد و بخشی نیز به اراضی بایر، باغات و اراضی کشاورزی در داخل محدوده و در میان بافت داخلی شهر مربوط است (جمشیدزهی شه‌بخش و قنبری، ۱۳۹۹، ص. ۹۳). علاوه‌بر مساحت محدوده قانونی، سطحی درحدود ۳۹٦/٦ هکتار نیز در خارج از محدوده قانونی است که روستاهای همجوار و سطوح بیمارستانی، مذهبی و... را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین کل محدوده موردمطالعه درحال‌حاضر ٦٨٦٥/٢ هکتار است که ٩٤/٢ درصد آن در

داخل محدوده و ۵/۷ درصد در خارج از محدوده قرار دارد. محدوده مطالعاتی مذکور را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. خزش شهر ناشی افزایش جمعیت ٤٠ درصدی که نشان می‌دهد، در حال حاضر ۲۰۰ هکتار از محدوده خارج از قانونی شهر به محدوده قانونی اضافه شده است که هم‌اکنون در زمره حاشیه شهر قرار دارد و با توجه به رشد شهر در آینده نزدیک نیز روند روبه‌رشدی را طی می‌کند. بنابر آنچه بیان شد، شهر زاهدان با توجه به وسعت محدوده شهر، هجوم متصرفان و تصویب‌نشدن قوانین اجرایی قوی، شکل هندسی حریم همواره دستخوش تصرفات و مالکیت‌های بخش عمومی و خصوصی قرار گرفته؛ هدایت و توسعه شهر را تحت‌تأثیر قرار داده و اجرای بسیاری از برنامه‌های توسعه آتی را با چالش جدی مواجه کرده است. ازآنجاکه برای رفع این مشکلات برنامه‌ها و طرح‌های متعدد ارائه شده، اما اثرگذار نبوده است، پژوهش حاضر قصد دارد به ارزیابی و شبیه‌سازی رشد شهر زاهدان طی دوره‌های زمانی تاریخی بپردازد و بر این اساس امکان تعیین جهت هوشمندانه گسترش محدوده شهر را میسر کرده و عوامل مداخله‌گر در این تغییرات را شناسایی کند.

۲. روش‌شناسی تحقیق

لایه‌های ضروری برای اجرای مدل SLEUTH شامل لایه‌های شیب، کاربری اراضی، استثنائات، لایه‌های شهری، لایه‌های شبکه حمل‌ونقل و لایه پستی‌وبلندی هستند که برگرفته از مخفف نام این مدل‌اند. زیرمدل UGM[1] فقط به مدل‌سازی رشد شهری می‌پردازد و مدل‌سازی از طریق پنج لایه اصلی انجام شد. مدیریت رشد شهری UGM به‌منظور مدل‌سازی و محاسبه ضرایب برازش به حداقل سه لایه مناطق شهری مربوط به سه سال مختلف، دو لایه شبکه حمل‌ونقل مربوط به دو سال مختلف، یک لایه درصد شیب، لایه مستثنیات و همچنین لایه سایه‌روشن پستی‌وبلندی‌ها به‌منظور مدل‌سازی نیاز دارد.

لایه‌های ورودی در محیط GIS و به کمک داده‌های سنجش از دور و مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه شد. ازآنجاکه در محیط GIS داده‌های گوناگونی از منطقه تجزیه و تحلیل می‌شوند، تمام داده‌های استفاده‌شده باید ازنظر هندسی با هم مطابقت داشته باشند و از سامانه

1. Urban Growth Management (UGM)

مختصات و سیستم تصویر واحدی تبعیت کنند؛ بنابراین در این تحقیق تمام داده‌ها استفاده‌شده به کمک نقاط کنترل به‌عنوان مبنا با RMS[1] قابل‌قبول (RMS<1) (براساس مطالعات وبر و زمردیان، ۱۹۸۸، به نقل از مهدی‌زاده و جمور، ۱۳۹۷، ص. ۱۸۵) تطابق هندسی و ترازیابی شده‌اند. از طرفی داده‌های استفاده‌شده باید اندازه سلول یکسانی داشته باشند؛ بنابراین همه لایه‌ها به اندازه سلول یکسان نمونه‌گیری مجدد[2] شد.

۲. ۱. پردازش تصاویر ماهواره‌ای و لایه‌های ورودی مدل

تصاویر ماهواره‌ای ابزار مناسبی برای کسب اطلاعات در ارتباط تغییرات زمانی و توزیع مکانی مناطق شهری هستند و به‌طور متناوب به‌منظور کشف تغییرات، مدل‌سازی و پیش‌بینی کاربری اراضی استفاده شده‌اند. برای شبیه‌سازی مدل رشد شهری، حداقل به چهار لایه تاریخی-زمانی براساس دوره‌های زمانی نیاز است. تعیین اینکه کدام سال به‌عنوان سال پایه تاریخی-زمانی باشد، به محقق براساس رصد کردن تغییرات رشد شهر در مقاطع زمانی بستگی دارد. در این پژوهش، تعیین سال پایه برای کالیبراسیون و ارزیابی رشد شهری براساس تحلیل رشد شهری بین سال‌های مختلف انجام گرفت. درنهایت، بهترین بازه زمانی برای شبیه‌سازی روند گذشته و کالیبراسیون به‌منظور تعیین ضرایب بین سال‌های ۱۳۷۰-۱۴۰۰ تعیین شد. چهار تصویر شهری انتخاب‌شده به‌ترتیب برای سال‌های تاریخی-زمانی ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ نهایی شد. سال ۱۳۷۰ به‌عنوان سال پایه برای شروع فرایند کالیبراسیون و سال‌های تاریخی-زمانی دیگر به‌عنوان سال‌های کنترل در نظر گرفته شدند. مدل رشد شهری براساس سال پایه، شروع به کالیبراسیون زیرِ کنترل سه سال کنترلی می‌کند تا براساس تحلیل روند و الگوی رشد در بازه مقاطع ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ به تعیین ضرایب رشد بپردازد. بعد از تعیین مقاطع تاریخی-زمانی، نیاز به تصاویر ماهواره‌ای بود که حدود شهر براساس آن‌ها تعیین شود. براساس تحقیقات دیگر انجام‌شده در دنیا و ایران و همچنین در دسترس بودن اطلاعات ماهواره‌ای، تصاویر ماهواره لندست به‌عنوان تصاویر مرجع انتخاب شد. سپس به تهیه این نقشه‌ها از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (www.usgs.gov) اقدام شد. سعی شد تا

1. Root Mean Square
2. Resample

تمام تصاویر مربوط به مقاطع زمانی با تاریخ اخذ یکسان باشد؛ مثلاً تمام تصاویر به تصاویر در فصل بهار یا زمستان و در شرایط بدون ابر و دیگر شرایط نامناسب جوی مربوط باشد.

جدول ۱. مشخصات مداری و ابعاد تصاویر ماهواره‌های لندست

مأخذ: www.usgs.gov

سال تصاویر دریافتی	سنجنده	قدرت تفکیک
۱۳۷۰/۷/۰۹	TM	۳۰ متر
۱۳۸۰/۰۵/۲۸	ETM+	۳۰ متر
۱۳۹۰/۰٤/۰۷	ETM+	۳۰ متر
۱٤۰۰/۰۸/۲۲	OLI	۳۰ متر

پس از اخذ تصاویر، مرحله دوم کار یعنی طبقه‌بندی تصاویر شروع می‌شود، اما به دلیل اینکه تصاویر دریافتی به ماهواره‌های مختلف لندست مربوط است که هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارد و همچنین برای برطرف کردن ایرادات تصاویر دریافتی مانند خطای رادیومتریک، اصلاحات جوی و اصلاحات هندسی تصاویر، در نرم‌افزار انوی[1] به روش پردازش و اصلاح کاهش تیرگی[2] پدیده اقدام شد. تصحیحات رادیومتریک در قبال تغییرات منظر، نوردهی، دید هندسی، شرایط جوی و نویز سنجنده ماهواره برای افزایش کیفیت و دقت تصاویر ماهواره‌ای باید صورت گیرد. روش‌های مختلفی ازجمله روش کاهش تیرگی پدیده و روش باقی‌مانده‌های لگاریتمی[3] در نرم‌افزار انووی وجود دارد. در این پژوهش از روش کاهش تیرگی پدیده برای اصلاحات رادیومتریک، جوی و هندسی در نرم‌افزار انووی استفاده شد (آرخی و طارمسری، ۱۳۹٤، ص. ۱۷٤).

بعد از انجام اصلاحات لازم، تمامی چهار تصاویر برای انجام طبقه‌بندی[4] آماده شدند. در این پژوهش با توجه به نوع داده‌ها و هدف پژوهش و خروجی‌های موردانتظار از نرم‌افزار سنجش از دور و همچنین با در نظر گرفتن دیگر پژوهش‌های مرتبط انجام‌گرفته در دنیا،

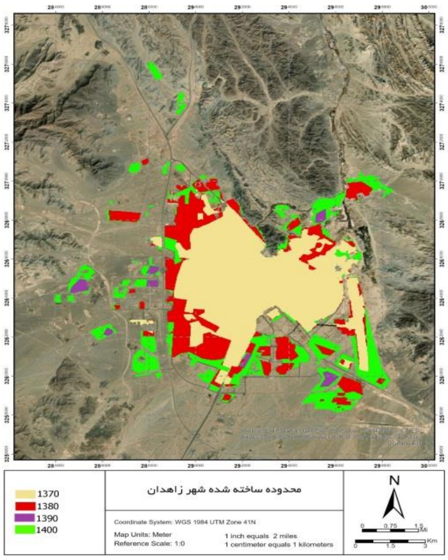
1. ENVI v4.8
2. Dark Subtract
3. Log Residuals
4. Classification

روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال به‌عنوان روش طبقه‌بندی انتخاب شد. طبقه‌بندی حداکثر احتمال، یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش نظارت‌شده است. ابتدا تصویر رنگی کاذب از منطقه ایجاد شد. برای انجام عملیات طبقه‌بندی لازم است که برای تصاویر ماهواره‌ای براساس تعداد باندها و شرایط باندها، بهترین ترکیب باندی برای به دست آوردن بهترین وضوح که تفاوت کاربری شهری با سایر کاربری‌ها را نشان دهد، انجام گیرد. نمونه انتخابی این پژوهش، ترکیب باندی ۵،۳،۱ (Red:5,Green:3,Blue:1) سنجنده ETM لندست ۷ برای تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۷۰ است. اثر ترکیب باندی در بارزکردن کاربری موردانتظار شهری در این مورد فراوان است.

پس از تعیین روش طبقه‌بندی تصاویر ماهواره لندست اخذشده، برای طبقه‌بندی تصاویر، ابتدا تمام تصاویر در محیط انوی به اندازه محدوده موردپژوهش برش داده شد. پس از تعیین محدوده پردازش به طبقه‌بندی مبادرت شد. با توجه به نوع خروجی موردانتظار، با در نظر گرفتن لایه‌های شهری موردنیاز برای ورود به مدل رشد شهری (شهر/غیرشهر)، نمونه‌های تعلیمی برای طبقه‌بندی در چند کلاس مختلف از هرکدام از طبقات کاربری اراضی روی تصویر رنگی کاذب مشخص شد. در این پژوهش براساس نیاز و ترکیب باندی انجام‌شده، دو کلاس نمونه تعلیمی برای کاربری شهری و کاربری اراضی بایر تعریف شد. تفکیک‌پذیری طبقات مختلف با استفاده از میانگین آن‌ها در هریک از باندها بررسی شد. نمونه‌های تعلیمی در مرحله بعد از نظر مکان مربوط به هر پیکسل به‌طور تصادفی جابه‌جا شدند و سپس به دو قسمت ۷۵ درصدی و ۲۵ درصدی تقسیم شدند. این کار برای کاهش اثر همبستگی مکانی صورت گرفت. پس از تعیین نمونه‌های تعلیمی و اختصاص کلاس‌های کاربری، به طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش حداکثر احتمال[1] اقدام شد. روش حداکثر احتمال، دقیق‌ترین و پراستفاده‌ترین روش نظارت‌شده است. فرایند طبقه‌بندی حداکثر احتمال فرض را بر این می‌گذارد که داده‌های آماری آموزشی برای هر کلاس در هر باند، به‌صورت نرمال[2] توزیع شده‌اند (آرخی و طارمسری، ١٣٩٤، ص. ۲۳۱). پس از طبقه‌بندی فیلتر مد[3] (اکثریت) به‌منظور

1. Maximum Likhood
2. Gaussian
3. Majority Filter

حذف تک‌پیکسل‌ها و قطعات کوچک اجرا شد. فیلتر مد یا میانه هر پیکسل مرکزی را با مقدار میانه عوض می‌کند؛ به عبارت دیگر، نوعی از فیلترهای یکدست‌ساز تصویر در برنامه انووی و ابزارهای آن است که خطاهای طبقه‌بندی یا نویزهای تصاویر پس پردازش را اصلاح می‌کند؛ برای مثال، کاربری غیرشهری داخل شهر را به کلاس شهری تبدیل می‌کند؛ زیرا بیشتر پیکسل‌های طبقه‌بندی دارای کلاس شهری هستند (آرخی و طارمسری، ۱۳۹٤، ص. ۳۳۹). بنا بر نوع داده‌های ورودی مدل رشد شهری که به لایه‌های شهری به‌صورت باینری شهر/غیرشهری نیاز دارد، در نرم‌افزار انوی تمامی کلاس‌های دیگر باهم ترکیب شد و با بازطبقه‌بندی نقشه تهیه‌شده به دو طبقه شهر و غیرشهر، نقشه مناطق شهری برای هریک از سال‌های کنترل تولید شد. سپس خروجی نهایی برای ورود به GIS تهیه شد. نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده در نرم‌افزار انووی برای سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۸۰، ۱۳۹۰ و ۱٤۰۰ به‌صورت شهر/غیرشهری به محیط ArcMap v10.3 وارد شدند (شکل ۱).



شکل ۱. روند رشد شهر زاهدان برای سال‌های ۱۳۷۰–۱٤۰۰

مأخذ: ترسیم توسط نگارندگان، ۱٤۰۱

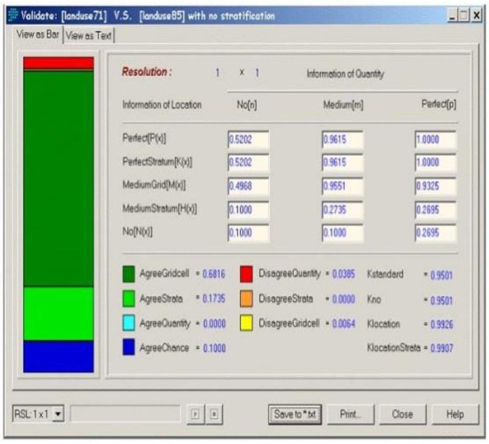
اولین پردازش روی این لایه‌ها، تبدیل رستر به وکتور برای حذف و اصلاح نقاطی است که به دلیل خطای طبقه‌بندی به‌عنوان مناطق شهری در نظر گرفته شده‌اند. برای انجام این کار، از

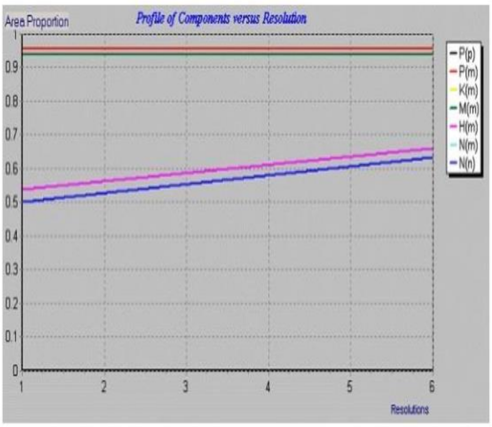
روش مشاهده مستقیم کاربر (چشمی) استفاده شد که در این روش کاربر به‌صورت مستقیم با در نظر گرفتن نقشه‌ای مشخص به‌صورت چشمی به اصلاح مناطق دارای خطا می‌پردازد. سپس تمام لایه‌های شهری به رستر تبدیل شدند. برای ورود لایه‌های شهری به مدل رشد شهری لازم است تا تمامی تصاویر و لایه‌ها به فرمت GIF با عمق پیکسل ۸ بیت (Pixel Depth= 8) تبدیل شوند. پس از انجام پردازش رستری لایه‌ها، مرحله تبدیل لایه‌ها به فرمت GIF انجام گرفت که لایه‌های نهایی به‌صورت طیفی از صفر تا ۲۵۵ تبدیل شدند؛ با این تفسیر که صفر به معنی نبود شهر و ۲۵۵ به معنی وجود شهر است (غیرشهر = صفر/ شهر= ۲۵۵). درنهایت نیز تمام چهار لایه مربوط به چهار سال به‌اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر نمونه‌گیری مجدد شدند. کاربری موردانتظار در این پژوهش، کاربری شهری است که نقاط ساخته‌شده انسانی را پوشش داده است. پس از انجام طبقه‌بندی لازم است، دقت و صحت طبقه‌بندی بررسی شود تا از میزان کارایی آن اطمینان حاصل شود. برای ارزیابی دقت کلی طبقه‌بندی[1]، روش ضریب شاخص کاپا[2] انتخاب شد که یکی از روش‌های پرکاربرد به‌منظور ارزیابی صحت و دقت طبقه‌بندی‌ها محسوب می‌شود.

منظور از اعتبارسنجی آن است که یک مدل در زمینه کاربردی دقت رضایت‌بخش داشته باشد (رایکی[3]، ۱۹۹٦، ص. ۲۳۲). مدل‌های شهری با مقایسهٔ خروجی شبیه‌سازی‌شده با مشاهدات دنیای واقعی، به کمک روش‌های مقایسه‌ای بصری ماتریس‌های Confusion و خطا اعتبارسنجی می‌شوند. اعتبارسنجی مدل CA یکی از چالش‌ها در کاربرد CA است. تاکنون بیشتر مدل‌های CA از مقایسهٔ بصری برای تأیید نتایج شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. بررسی عملکرد خود مدل نیز بسیار بحث‌برانگیز است؛ زیرا در سیستم‌های خودسازمانده وضعیت خاصی وجود دارد. مدل‌های CA باید بر پایهٔ معقولیت این مدل‌ها ارزیابی شود. اعتبارسنجی مدل در این پژوهش با استفاده از ماژول Validate در نرم‌افزار Idrisi انجام شد. نتایج مقایسهٔ تصویر شبیه‌سازی‌شده و کاربری اراضی واقعی سال ۱٤۰۰، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. این ماژول روشی را ارائه می‌دهد که سازش یا توافق بین دو تصویر را اندازه‌گیری

1. Overall Accuracy
2. KAPA Index
3. Rykiel

می‌کند (نقشهٔ مقایسه که تصویر شبیه‌سازی‌شده شده و مدل فراهم کرده است و نقشهٔ مرجع که تصویر واقعی زمین است). ماژول Validate تحلیل آماری جامعی را فراهم می‌کند که هم‌زمان به دو پرسش مهم جواب می‌دهد: یکی اینکه چگونه یک جفت از نقشه‌ها در بخش‌هایی از کمیت سلول‌ها در هر دسته با هم سازش دارند؟ و دیگر اینکه چگونه یک جفت از نقشه‌ها در بخش‌هایی از موقعیت سلول‌ها در هر دسته با هم سازش دارند؟ روش Validate از شاخص‌های مختلف ضریب کاپا برای پاسخ‌دهی به این پرسش‌ها استفاده می‌کند. آمارها نشان می‌دهد، چطور نقشهٔ مقایسه با نقشهٔ مرجع سازش دارد. آنالیز سازش و غیرسازش میان دو تصویر را با استفاده از مؤلفه‌های زیر جدا می‌کند: سازش به‌دلیل تغییر، سازش به‌دلیل کمیت، سازش به‌دلیل موقعیت در سطح طبقه‌بندی‌شده، سازش به‌دلیل موقعیت در سطح سلولی شبکه؛ سازش نکردن به‌دلیل موقعیت در سطح سلولی شبکه، سازش نکردن به‌دلیل موقعیت در سطح طبقه‌بندی‌شده و سازش نکردن به‌دلیل کمیت. با توجه به شکل ۲ نتیجه می‌گیریم، دقت مدل اسلوس ۹۵ درصد است که این رقم برای شبیه‌سازی در میان دیگر روش‌های مرسوم شبیه‌سازی، جزو بهترین نتایج قابل‌دستیابی است.





شکل ۲. محاسبه دقت طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از شاخص کاپا در نرم‌افزار Idrisi

مأخذ: ترسیم توسط نگارندگان، ۱۴۰۱

۲. ۲. لایه شبکه حمل‌ونقل

با توجه به نیاز مدل رشد شهری به دولایه حمل‌ونقلی از منطقه موردمطالعه، دو لایه شبکه حمل‌ونقلی آماده شد. شبکه راه‌های منطقه به‌صورت لایه‌برداری از روی تصاویر ماهواره‌ای اخذشده از منطقه و همچنین طرح جامع حمل‌ونقل زاهدان به شیوه رقومی کردن روی صفحه استخراج شد. سپس لایه‌برداری ایجادشده به ساختار رستری با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر، فرمت GIF به‌صورت باینری راه/غیرراه (راه = ۲۵۵/ غیرراه = صفر) با عمق پیکسل ۸ بیت تبدیل شد. در ترسیم شبکه حمل‌ونقلی سعی شد تا راه‌های اصلی و تأثیرگذار رقومی‌سازی شوند. این تصاویر قبلاً با استفاده از نقشه طرح تفصیلی شهر زاهدان تطابق هندسی شدند. این لایه به کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه از نقشه رقومی ارتفاع تهیه‌شده از سازمان زمین‌شناسی آمریکا به دست آمد. ابتدا نقشه رقومی ارتفاع تهیه‌شده به سیستم مختصات UTM Zone 41 N انتقال یافت و سپس به‌اندازه محدوده موردمطالعه برش شد. نقشه تهیه‌شده دارای اندازه تفکیک حدود ۲۷ متر است که ابتدا با درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایه به‌اندازه تفکیک ۳۰ متر نمونه‌گیری مجدد شد. سپس از این داده، نقشه شیب منطقه به درصد تهیه شد. درنهایت به فرمت GIF با عمق پیکسل ۸ بیت تبدیل شد.

۲. ۳. لایه سایه‌روشن پستی‌وبلندی

از این لایه می‌توان به‌عنوان زمینه در نقشه‌های خروجی استفاده کرد. مدل مدیریت رشد شهری نیز از سایه و روشن پستی‌وبلندی‌ها تنها به‌منظور زمینه خروجی‌ها استفاده می‌کند. برای تهیه نقشه سایه‌روشن، زاویه ارتفاعی ٤٥ درجه و آزیموت ۲۲۵ درجه در نظر گرفته شد. سپس با تبدیل نقشه حاصل به رستر با تفکیک مکانی ۳۰ متر و فرمت GIF با عمق پیکسل هشت‌بیتی، نقشه سایه و روشن منطقه برای ورودی مدل آماده شد.

۲. ٤. لایه مطلوبیت توسعه (مستثنیات)

این لایه به‌عنوان لایه‌ای کاربر–تعریف در مدل رشد شهری UGM در نظر گرفته شده است. در ورژن‌های اولیه مدل وظیفه این لایه، دخالت عوامل محدودکننده رشد شهر یا عوامل مستثنا از رشد شهر است؛ برای مثال، مناطق حفاظت‌شده، مناطق مردابی، مناطق غیرقابل‌گسترش دیگر. در پژوهش‌های اخیر از این لایه به‌عنوان قابلیتی برای ایجاد لایه

جذابیت/دافعه شهری استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر، محقق می‌تواند عواملی را که می‌توانند در جاذبه یا دافعه شهرنشینی مؤثر باشند، با توجه به نوع روش خاص خود محقق و چارچوب نحوه ایجاد مقادیر لایه‌ها در مدل رشد شهری، در رشد آینده شهر دخالت دهد؛ بنابراین در این مطالعه از این لایه به‌عنوان لایه‌ای جامع (جدول ۱) از ترکیب عوامل محرک و موانع رشد شهری زاهدان استفاده شده است.

۲. ۵. تحلیل و جمع بندی امکانات، پتانسیل‌ها و موانع رشد شهری زاهدان

در این پژوهش برای نشان دادن شایستگی لایه‌ها برای رشد شهری، از ارزیابی چندمعیاره (MCE) استفاده شد. شاخص‌های جدول ۲ براساس مرور پیشینه و ادبیات تحقیق استخراج شدند که درنهایت با توجه به در دسترس بودن داده‌ها و تطابق با هدف تحقیق و شرایط زاهدان، نهایی شدند. ارزیابی چندمعیاره اغلب به‌منظور ترکیب لایه‌های رستری برای رسیدن به یک لایه شایستگی عوامل استفاده می‌شود. در طی فرایند ارزیابی چندمعیاره، لایه‌های رستری عوامل محیطی مؤثر با سلول‌های دارای مقادیر مختلف آماده می‌شوند. در این پژوهش از میان مدل‌های ارزیابی چندمعیاره، مدل فرایند ارزیابی سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. بیست متخصص در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت شهری انتخاب شدند که درنهایت ۱۵ پرسشنامه قابل‌استفاده بود.

جدول ۲. عوامل مؤثر در رشد شهری زاهدان و نتایج وزن‌دهی روش AHP

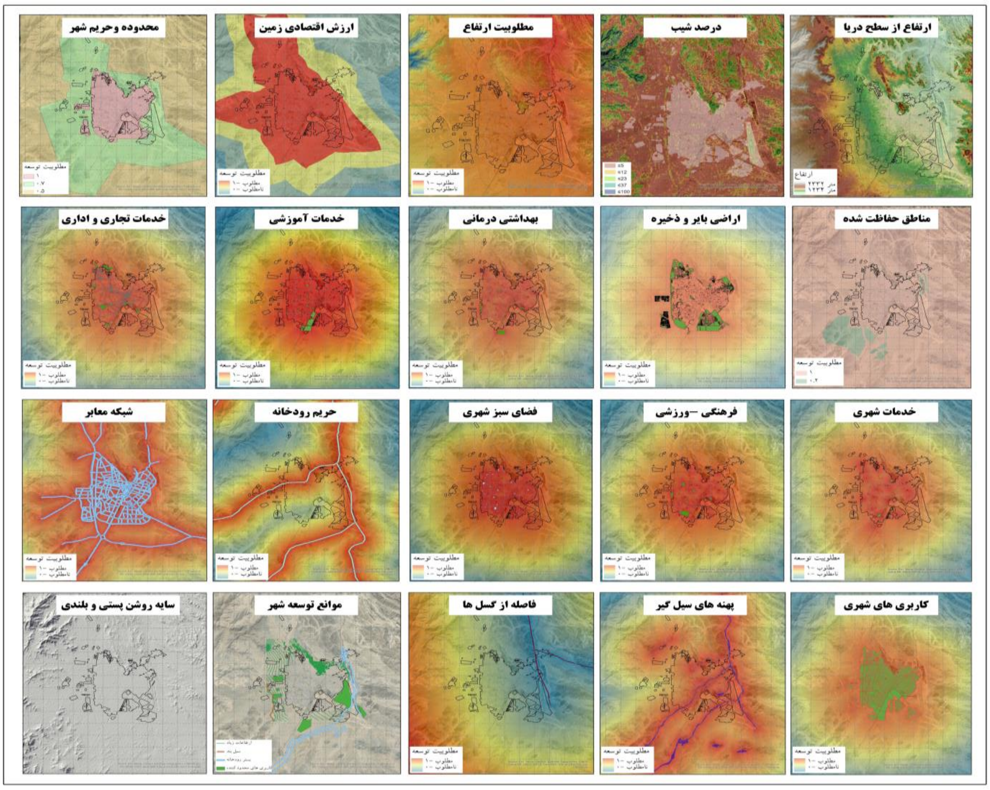
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

عوامل	فاکتورها	میزان شایستگی	وزن AHP
عوامل فیزیکی و کالبدی	شیب	براساس افزایش شیب از ۳۰ درصد به بالا، مطلوبیت توسعه کاهش پیدا می‌کند.	۰,۰۲٦۹
	سیل	میزان شایستگی مناطق سیل خیز= صفر / سایر مناطق= ۱	۰,۰٦۱٦
	گسل	براساس میزان فاصله اقلیدسی (به متر) از بیشترین فاصله (۱) تا کمترین فاصله (صفر) که با افزایش فاصله میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت افزایش می‌یابد.	۰,۰٥٦۷
	ارتفاع	براساس افزایش میزان ارتفاع از ۱٥٥۰ به بالا، مطلوبیت توسعه به‌صورت یکنواخت کاهش پیدا می‌کند.	۰,۰۲۰۲

عوامل	فاکتورها	میزان شایستگی	وزن AHP
	فاصله از رودخانه‌ها	میزان شایستگی در فاصله ۰–۲۵۰ متر = ۰ میزان شایستگی در فاصله ۲۵۰ متر به بالا = با افزایش فاصله میزان مطلوبیت کاهش می‌یابد.	۰,۰۱۲۲
	موانع محدود کننده رشد	توسعه در این محدوده‌ها ممکن نیست= صفر/ سایر مناطق =۱	۰,۰۱۰۱
عوامل دسترسی به خدمات شهری	دسترسی به خدمات بهداشتی و درمانی	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (1) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰۱۵٦
	دسترسی به خدمات تجاری و اداری	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (1) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰٥٦٤
	دسترسی به خدمات فرهنگی و ورزشی	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (1) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰۲٦٥
	دسترسی به پارک‌ها و فضای سبز	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (۱) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰۱۲
	دسترسی به تجهیزات و خدمات شهری	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (۱) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰۲۰۲
	دسترسی به خدمات آموزشی	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (۱) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۰۱۲۲
عوامل اجتماعی-اقتصادی	قیمت و ارزش زمین	مطلوبیت توسعه با کاهش ارزش زمین براساس دوری از محدوده شهری، کاهش پیدا می‌کند.	۰,۰۱٦۳
	تراکم و توزیع فضایی جمعیتی	براساس شدت تراکم در محدوده، با فاصله از مراکز تراکم جمعیتی میزان مطلوبیت کم می‌شود.	۰,۰۱٤
عوامل سیاسی و اداری	مرز خدمات شهرداری و توسعه‌های آتی	مطوبیت توسعه در محدوده مصوب شهری = ۱ / حریم شهر = ۰,۷۵ / خارج حریم = ۰,۵	۰,۰۰۲٥
	اراضی بایر و ذخیره	اراضی بایر و ذخیره شهری = ۱	۰,۰۲۱

عوامل	فاکتورها	میزان شایستگی	وزن AHP
	شهری	مطلوبیت سایر اراضی براساس فاصله از اراضی ذخیره کاهش می‌یابد.	
حمل‌ونقل و شبکه ارتباطی	دسترسی به شبکه حمل‌ونقل	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (۱) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۲۰٦۳
کاربری زمین	دسترسی به اراضی ساخته‌شده شهری	براساس میزان دسترسی اقلیدسی (به متر) از بیشترین دسترسی (۱) تا کمترین دسترسی (صفر) که با کاهش دسترسی میزان مطلوبیت به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد.	۰,۱۰۵۸
	محدوده‌های اکولوژیک و حفاظت‌شده	میزان مطلوبیت مناطق اکولوژیک= ۰,۲ / سایر مناطق = ۱	۰,۰۳۵

براساس نتایج مدل AHP، عامل دسترسی به شبکه حمل‌ونقل بیشترین اهمیت را در مقایسه با سایر عوامل مؤثر در رشد شهر زاهدان دارد. عامل مهم بعدی، دسترسی به کاربری‌های شهری است که رتبه دوم را از نظر اهمیت دارد. عامل سوم نیز دسترسی به خدمات تجاری و اداری است.



شکل ۳. مطلوبیت توسعه اراضی شهر زاهدان

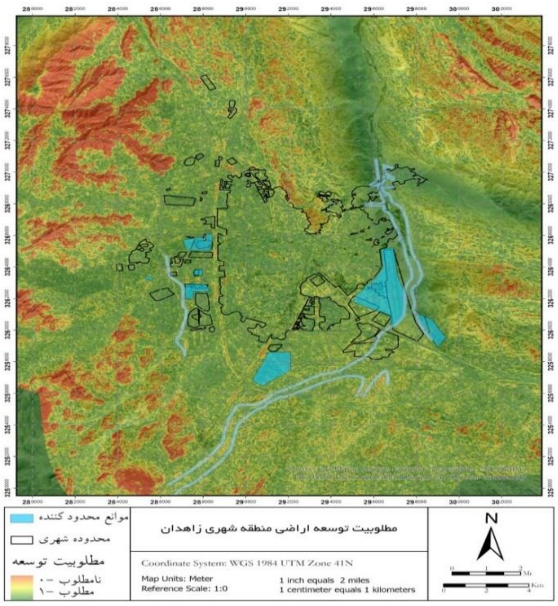
مأخذ: ترسیم توسط نگارندگان، ۱٤۰۱

۲. ٦. ترکیب لایه‌ها از همپوشانی WLC و ساخت لایه مطلوبیت توسعه نهایی

به‌طورکلی، دو روش عمده برای همپوشانی لایه‌های عوامل در روش GIS-MCE وجود دارد: روش ترکیب خطی–وزنی و روش بولین. روش ترکیب خطی–وزنی، ابتدا لایه‌های عوامل را استانداردسازی می‌کند و سپس با تخصیص وزن اهمیت نسبی به لایه‌های عوامل، لایه‌های استانداردشده و وزن‌های آن‌ها را با هم ترکیب می‌کند و یک نقشه شایستگی نهایی تولید می‌کند. در روش ترکیب خطی–وزنی خاصیت جبرانی وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که امتیاز کم یک موقعیت خاص در یک لایه عامل می‌تواند با امتیاز زیاد همان موقعیت در لایه عامل جبران شود. طریقه همپوشانی در ترکیب خطی–وزنی به‌صورت فرمول زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{n} X_i W_i$$

در این معادله، S به معنی شایستگی نهایی یا کلی اراضی، X_i نشان‌دهنده مقدار استانداردشده و عامل i و W_i بیانگر وزن محاسبه برای عامل i است. در این معادله، n تعداد عوامل استفاده‌شده در تعیین شایستگی را نشان می‌دهد. تمام عوامل مؤثر در رشد شهر زاهدان که در قسمت قبل به آن‌ها اشاره شد، به روش ترکیب خطی-وزنی، همپوشانی رستری در نرم‌افزار GIS قرار گرفتند. با توجه به اینکه در فرایند تهیه‌سازی لایه‌های عوامل، استانداردسازی به روش فازی و الگوریتم تابع عضویت خطی براساس جدول ۲ انجام شده است، در این مرحله هر لایه در وزن AHP مربوط به خود ضرب شد و درنهایت طبق فرمول بالا همپوشانی نهایی شد. این لایه نیز براساس دستورالعمل داده‌های ورودی مدل به فرمت GIF با تفکیک مکانی ۳۰ متر و عمق تصویر ۸ بیت در بازه صفر تا ۲۵۵ گسترش داده شد. لایه نهایی مطلوبیت توسعه در شکل ٤ مشاهده می‌شود.



شکل ٤. مطلوبیت توسعه اراضی شهر زاهدان

مأخذ: ترسیم توسط نگارندگان، ۱٤۰۱

نکته درخورتوجه در ورودی لایه‌های مدل رشد شهری UGM، الزام نام‌گذاری لایه‌ها همانند خواست مدل، تعریف محدوده یکسان (سطر و ستون) برای تمام لایه‌ها، فرمت مشخص GIF با بسط در بازه صفر تا ۲۲۵، سیستم تصویر یکسان و عمق تصویر ۸ بیت برای تمام لایه‌ها است که در فرایند تهیه داده‌ها تمامی لایه‌ها طبق دستورالعمل مدل تهیه شدند.

۳. مبانی نظری تحقیق

مدل‌ها، ابزار مناسبی برای بیان پیچیدگی فرایندهای توسعه در بیانی ساده هستند. از ویژگی‌های بارز فرایند رشد شهری، متغیر بودن آن در بستر زمان و مکان است. ازآنجاکه مدل‌سازی این‌گونه فرایندها توسط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی صورت می‌گیرد که در ابتدا برای کار با داده‌های مکانی (بدون قید زمان) توسعه یافته‌اند، روش معرفی بعد زمان در GIS می‌تواند از اهمیت بسزایی در این زمینه برخوردار باشد (اسفنده و همکاران، ۱٤۰۰، ص.٥٤). به‌طورکلی، سه روش مجزا برای تلفیق ابعاد پویای زمانی با تجزیه و تحلیل‌های مکانی در GIS وجود دارد (کریمی، ۱۳۹۱، ص. ۷). نظریه سلول‌های خودکار[1] (CA)، تئوری عامل‌ها[2] و تئوری فراکتال‌ها[3]؛ بر این اساس، برای بررسی سیستم‌ها و فرایندهای پویای مکانی (مانند فرایند رشد شهری)، مدل‌های متفاوتی حاصل از تلفیق GIS با یک یا چند مورد از این مدل‌ها توسعه یافته‌اند؛ به این ترتیب، انواع مدل‌های برپایه سلول‌های خودکار که بارزترین وجه تمایز در به‌کارگیری این مدل‌ها، نحوه تعیین و محاسبه قوانین انتقال در آن‌هاست، عبارت‌اند از: ۱) مدل ماکرو و میکرو تلفیق‌شده با سلول‌های خودکار، ۲) مدل سلول‌های خودکار فازی، ۳) مدل سلول‌های خودکار شبکه‌های عصبی مصنوعی، ٤) مدل سلول‌های خودکار تصادفی و ٥) مدل سلول‌های خودکار برپایه آمار (ساکیه، ۱۳۹٤، ص. ۱۲). مدل‌های CA به دلیل داشتن ماهیت پویا و همچنین خصوصیات منحصر به فرد آن‌ها در مدل‌سازی از عوارض طبیعی و فیزیکی سطح زمین، کاربرد وسیعی در پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین و همچنین توسعه زمین‌های شهری پیدا کرده‌اند (اسفنده و همکاران، ۱٤۰۰، ص. ٥٤). مدل CA اولین بار در

1. Cellular Automata (CA)
2. Agents
3. Fractal

دهه ۱۹٤۰ توسط دو ریاضیدان به نام‌های اولام و نیـومن بـه‌منظور شـبیه‌سـازی سیسـتم‌هـای پیچیده در فیزیک و زیست‌شناسی به کار گرفته شد. از آن پس در سایر حـوزه‌هـای مطالعـاتی مانند مدل‌سازی شهری استفاده شد (زارعی و آل‌شیخ، ۱۳۹۱، ص.٤). هر شبکه خودکـار یـک سیستم پویای گسسته است که فضا در آن به سلول‌های مکانی منظم و جریان زمانی به مراحل مختلف تقسیم می‌شود. هر سلول در این سیستم دارای یکی از وضعیت‌های محدود مانند زنده یا مرده است. وضعیت هر سلول براساس قـوانین محلـی کـه در آن مقطـع زمـانی خـاص بـه وضعیت کنونی آن و وضعیت همسایگانش در مرحله زمانی قبل بستگی دارد، تعیـین می‌شـود (ولفرام، ۱۹۸٤، ص.۲). در شبکه خودکار پـنج عنصـر اصـلی وجـود دارد کـه شـامل سـلول، وضعیت، قوانین انتقال، قوانین همسایگی و زمان می‌شوند. در جدول ۳ برخی از انـواع مـدل-های CA از جنبه‌های متفاوت با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۳. انواع مدل‌های سلول‌های خودکار، ویژگی‌ها، ضعف‌ها و قوت‌ها

مأخذ: اسفنده و همکاران، ١٤٠٠، ص. ٥٦

نام مدل	نوع مدل	عوامل بررسی‌شده	نرم‌افزار موردنیاز	قوت	ضعف
UrbanSim	CA	ساختار حمل‌ونقل، زون بندی محلی، طرح‌های شهری، کاربری اراضی	Java، نرم افزار اقتصاد سنجی، مدل حمل‌ونقل	مدل‌سازی پویا براساس تصمیم‌گیری‌های واقعی صاحبان مسکن و کار در پاسخ به سیاست‌گذاری‌ها	نیاز به داده‌های صریح و مشخص، نبود دسترسی همیشگی به داده‌های ورودی، کالیبراسیون طولانی و پیچیده
SLEUTH	CA	ساختار حمل‌ونقل، زون بندی محلی، طرح‌های شهری، تغییر در مناطق شهری طی زمان	UNIX, gnu C compiler	سادگی استفاده در مناطق مختلف، اجرا در بیش از ۱۰۰۰ شهر، قابلیت استفاده از فرایند مدل‌سازی پویا، عملکرد ساده و توانایی زیاد در نشان‌دادن تغییرات پیچیده شهری، نیاز به اطلاعات مکانی مختلف اما اندک و در دسترس، قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف، نرم‌افزار رایگان و پشتیبانی توسط سایت رسمی Gigalopolis	مراحل کالیبراسیون نسبتاً پیچیده، لزوم آشنایی با UNIX
DINAMICA	CA	ساختار حمل ونقل، زون‌بندی محلی، کاربری اراضی	GIS	امکان استفاده از عدم قطعیت	استفاده عموماً به‌صورت منطقه‌ای
Markov Chain	CA	کاربری اراضی	IDRISI	نتایج دقیق در مقیاس‌های بزرگ	پیش‌بینی فضایی تغییرات صرفاً براساس تغییرات کاربری اراضی

در میان تمام این مدل‌ها، مدل SLEUTH (حاصل تلفیق رویکرد مدل‌سازی سلول‌های خودکار با علوم آمار، کامپیوتر و GIS) احتمالاً مناسب‌ترین آن‌هاست؛ زیرا دورگه‌ای از دو گروه مدل CA است که توانایی مدل‌سازی توسعه شهری و تغییر کاربری اراضی را دارد (کامیاب و سلمان‌ماهینی، ۱۳۹۷، ص. ۵). مدل SLEUTH به‌منظور شبیه‌سازی فرایند رشد شهری برمبنای شبکه‌های خودکار ایجاد شد. نام مدل از شش لایه ورودی آن شامل شیب، پوشش زمین، مناطق مستثنی از توسعه، مناطق شهری، شبکه حمل‌ونقل و لایه سایه روشن گرفته شده است. این مدل الگوهای شهری را با کاربرد چهار نوع از تغییرات کاربری شهری شامل رشد خودبه‌خود، رشد مرکز انتشار جدید، رشد حاشیه و رشد متأثر از جاده استخراج می‌کند. چهار نوع رشد شهری در طول هر چرخه رشد به کار برده می‌شوند و از طریق کنش متقابل با پنج ضریب رشد (پخش، زایش، گسترش، جاذبه جاده و مقاومت شیب) کنترل می‌شوند (کلارک و گایدوس[1]، ۱۹۹۸، ص. ۷۰۲؛ کلارک و همکاران، ۱۹۹۷، ص. ۲۵۰).

پس از گسترش شهرنشینی و مهاجرت‌های بی‌رویه به دنبال صنعتی شدن، شهرها با پدیده‌ای با عنوان رشد خودبه‌خودی مواجه شدند. همین عامل منجر شد که پس از جنگ جهانی دوم، انگلستان برای جلوگیری از این معضل شهری مفهوم کمربند سبز را طرح کرد و به دنبال آن آمریکا در اوایل دهه ۱۹۷۰ راهکار مدیریت شهری را عنوان کرد (کوهن، ۲۰۰٦). این اصطلاحات آخرین اقدامات و پژوهش‌ها در حوزه محدوه شهر و کنترل آن نبود و به دنبال برخورد با مشکلات رشد بی‌رویه شهرها، پژوهش‌های متعددی در کشورهای مختلف صورت گرفت که نمونه آن‌ها معرفی خواهد شد. لیائو[2] و همکاران (۲۰۰۱) مدل‌سازی پویایی شهر را در ارزیابی مکان دفع پسماند در مناطق شهری استفاده کرد. در این تحقیق از مدل SLEUTH که براساس CA است، استفاده شد. یانگ و لو[3] (۲۰۰۲) از CA در مدل‌سازی رشد شهری و تغییر منظر در آتلانتا استفاده کردند. این مطالعه نشان داد، روش‌های مدل‌سازی سلولی و اطلاعات جغرافیایی، روش‌های مفید در طرح‌ریزی مناطق شهری هستند. باردو[4] و همکاران

1. Clarke & Gaydos
2. Leao
3. Yang & Lo
4. Barredo

(۲۰۰۳) از CA در مدل‌سازی پویایی شهر دوبلین استفاده کردند. در این تحقیق بـا اسـتفاده از CA، رشد شهر تا سال ۱۹۹۸ مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد، CA قابلیت خوبی برای استفاده در مدل‌سازی شهر دارد. لیائو و همکاران (۲۰۰٤) قابلیت مـدل‌های CA را در منـاطق شـهری کشورهای درحال‌توسعه با مطالعه در پورتو آلگره[1] برزیل بررسی کرد. این تحقیـق نشـان داد، مدل‌های CA پایه نتایج رضایت‌بخشی نیز برای مدل‌سازی شهرهای کشورهای درحال‌توسـعه ارائه می‌کنند. لی[2] (۲۰۰۵) تدابیری همچون محدوده رشد شهری، محدوده خـدمات شـهری و کمربند سبز را به‌عنوان سیاست‌های مهار شهری طرح کرد. وو[3] و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی مدل SLEUTH در محدوده شهری شنیانگ در شمال شرق چین پرداختنـد. آن‌هـا به‌صـورت کمّی، کارایی مدل را برحسب میزان و موقعیت مکانی توسعه شهری، الگوهای مکانی شهری و قابلیت پیشگویی آزمایش کردند. نتایج نشان داد، این مدل در شنیانگ از کارایی بسـیار خـوبی برخوردار است. وانی و راما چاندرا پراساد[4] (۲۰۲۱) بـه مقایسـه کـارایی مـدل رشـد شـهری مشهور مبتنی بر CA و SLEUTH و یک مدل ترکیبـی مبتنـی بـر CA بـا الگـوریتم ژنتیـک (GA) برای توسعه سناریوهای رشد آینده شـهر پرداختنـد. مـدل‌ها بـا اسـتفاده از نقشـه‌های کاربری زمین که از تصـاویر مـاهواره‌ای لندسـت بـه دسـت آمده‌انـد، سـاخته، کالیبره‌شـده و اعتبارسنجی شده‌اند. تحلیل اهمیت آماری عوامل محرک نشـان مـی‌دهـد کـه زمـین و تـراکم جمعیت دو عامل غالب تأثیرگذار بر گسترش شهر هستند. هر دو مدل خروجـی در پیش‌بینـی رشد شهری نشان می‌دهنـد کـه فضـاهای بـاز موجـود در محـدوده شـهر موجـود بیشـتر بـه ساخته‌شده تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده توسعه پرشده است و رشد بیشتری در حاشیه شـهر موجود رخ می‌دهد. در تحقیق ایلیاسووا[5] و همکاران (۲۰۲۱)، مدل رشـد شـهری SLEUTH برای اولین بار برای شهرها پس از اتحاد جماهیر شوروی کالیبره و تأیید شده است. هدف این مطالعه، پایش، ارزیـابی، شبیه‌سـازی و مقایسـه پویایی‌هـای رشـد شـهری مکـانی و زمـانی و الگوهای فضایی دو شهر بزرگ آلماتی و آستانه با استفاده از داده‌های سـنجش از دور رایگـان

1. Porto Alegre
2. Lee
3. Wu
4.Vani & Rama Chandra Prasad
5. Ilyassova

است. معیارهای گسترش شهری و مدل SLEUTH برای ارزیابی پویایی رشد شهری استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی رشد شهری از SLEUTH نشان می‌دهد که آستانه از رشد شهری آلماتی پیشی خواهد گرفت و تا سال ۲۰۳۰ به‌عنوان بزرگ‌ترین شهر قزاقستان ظاهر خواهد شد. آستانه ممکن است پیشرفت‌های جهشی و روبانی بیشتری را تجربه کند. در آلماتی، رشد شهری ممکن است در شمال و شمال غرب رخ دهد. براساس پژوهش جوارنه[1] (۲۰۲۱)، توسعه شهری و از دست دادن زمین‌های عمدتاً کشاورزی، دو چالش پیش روی اردن است. رشد شهری کنترل‌نشده شهرداری اردن بزرگ (GIM) که در پربارترین منطقه کشاورزی اردن واقع شده است، چالش بزرگی را هم در حفظ زمین‌های زراعی برتر و هم در توسعه استراتژی‌های برنامه ریزی جامع ایجاد کرده است. این مطالعه از دست دادن زمین کشاورزی برای رشد شهری در GIM از سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۵۰ را بررسی کرد و پیامدهای منفی فرایند ادغام سال ۲۰۰۱ بر از دست دادن زمین‌های کشاورزی را نشان داد.

در ایران نیز تحقیقاتی با استفاده از این مدل انجام شده‌اند؛ مطالعه روند، الگوی فضای رشد، عوامل اثرگذار بر رشد شهری و پیش‌بینی رشد آینده کلان‌شهر تبریز تا سال ۲۰۳۵ در پژوهش داداش‌پور و همکاران (۲۰۱۹)، برنامه‌ریزی کاربری اراضی در شهر گرگان با ترکیب مدل رشد شهری SLEUTH با روش ارزیابی چندمعیاره و مدل ارزیابی اثرات بلندمدت هیدرولوژیکی در پژوهش کلارک و ماهینی (۲۰۱۳) و شناسایی الگوهای تاریخی و پیش‌بینی اندازه و نحوه رشد آینده شهری و تغییرات کاربری اراضی در مناطق ساحلی با استفاده از جدیدترین نسخه مدل SLEUTH-3R در پژوهش اسفنده و همکاران (۱٤۰۰). این تحقیقات نشانگر پتانسیل و کارایی آن برای تحقیقات مشابه است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی و شبیه‌سازی رشد شهر زاهدان است.

1. Jawarneh

٤. یافته‌های تحقیق

٤. ۱. نتایج شبیه‌سازی و کالیبراسیون رشد شهری با استفاده از مدل SLEUTH-3r

هدف از مرحله کالیبراسیون لایه‌های ورودی، به دست آوردن بهترین مقادیر ضرایب رشد برای منطقه موردمطالعه است. کالیبراسیون مدل SLEUTH به شیوه BurtForce انجام می‌گیرد. مدل SLEUTH براساس مجموعه ضرایبی که در مرحله کالیبراسیون تعیین می‌شود، پیش‌بینی می‌کند. مجموعه ضرایب تعیین‌شده در مرحله کالیبراسیون ضرایب اولیه بوده و بیان‌کننده نحوه تغییرات از گذشته تاکنون است، اما در مدل SLEUTH به دلیل خودسازمان‌دهی، ضرایب تغییر خواهند کرد و اصلاح خواهند شد. مدل SLEUTH ضرایب رشد را به‌صورت‌کلی برای محدوده موردمطالعه کالیبره کرده و براساس همین ضرایب، رشد آتی برای کل محدوده را پیش‌بینی می‌کند. کالیبراسیون از سال‌های ۱۳۷۰–۱٤۰۰ انجام شد. سپس ضرایب رشد از بین ترکیب سنجه‌هایی انتخاب شد که بهترین عملکرد را داشتند تا از این بهترین ضرایب برای مرحله پیش‌بینی استفاده شود. جدول ٤ نمونه نتایج کالیبراسیون مدل برای شهر زاهدان را نشان می‌دهد.

جدول ٤. خروجی کالیبراسیون مدل و سنجه‌های آن برای تعیین ضرایب مدل SLEUTH

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

run	diffusion	breed	spread	slp_resist	road_grav	control	area	run	cluster	run	edges
۱۰۰	۱	۱	۱۰۰	۱	۱	۲۰۰۵	۰,۲۱	۱۰۰	۰,۲۷	۱۰۰	−۰,۲
۱۰۱	۱	۱	۱۰۰	۱	۲۵	۲۰۲۰	۰,۲۱	۱۰۱	۰,۲۹	۱۰۱	−۰,۱۹
۱۰۵	۱	۱	۱۰۰	۲۵	۱	۲۰۰۵	۰,۱	۱۰۵	۰,۳	۱۰۵	−۰,۲۱
۷۵	۱	۱	۷۵	۱	۱	۲۰۲۰	۰,۰۹	۷۵	۰,۳۲	۷۵	−۰,۲۱
۷٦	۱	۱	۷۵	۱	۲۵	۲۰۰۵	۰,۱	۷٦	۰,۳۳	۷٦	−۰,۲
۱۰۳	۱	۱	۱۰۰	۱	۷۵	۲۰۲۰	۰,۲۲	۱۰۳	۰,۳۳	۱۰۳	−۰,۱۸
۱۰٤	۱	۱	۱۰۰	۱	۱۰۰	۲۰۰۵	۰,۲۲	۱۰٤	۰,۳۳	۱۰٤	−۰,۱۸
۱۰۲	۱	۱	۱۰۰	۱	۵۰	۲۰۲۰	۰,۲۲	۱۰۲	۰,۳۳	۱۰۲	−۰,۱۸
۸۰	۱	۱	۷۵	۲۵	۱	۲۰۰۵	−۰,۰۱	۸۰	۰,۳۳	۸۰	−۰,۲۲
۷۱	۱	۱	۵۰	۱۰۰	۲۵	۲۰۲۰	−۰,۳۸	۷۱	۰,۳۳	۷۱	−۰,۲۸

run	diffusion	breed	spread	slp_resist	road_grav	control	area	run	cluster	run	edges
۹٦	۱	۱	۷۵	۱۰۰	۲۵	۲۰۰۵	−۰,۲۷	۹٦	۰,۳٤	۹٦	−۰,۲۵
۸۱	۱	۱	۷۵	۲۵	۲۵	۲۰۲۰	۰	۸۱	۰,۳٤	۸۱	−۰,۲۱
۷۰	۱	۱	۵۰	۱۰۰	۱	۲۰۰۵	−۰,۳۸	۷۰	۰,۳٤	۷۰	−۰,۲۸
۱۲۲	۱	۱	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۰۲۰	−۰,۲۱	۱۲۲	۰,۳٤	۱۲۲	−۰,۲۳
۱۲۳	۱	۱	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	۲۰۰۵	−۰,۲۱	۱۲۳	۰,۳٤	۱۲۳	−۰,۲۳
۱۲٤	۱	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۲۰	−۰,۲۱	۱۲٤	۰,۳٤	۱۲٤	−۰,۲۳
۱۰٦	۱	۱	۱۰۰	۲۵	۲۵	۲۰۰۵	۰,۱	۱۰٦	۰,۳٤	۱۰٦	−۰,۲۱
۹۷	۱	۱	۷۵	۱۰۰	۵۰	۲۰۲۰	−۰,۲۷	۹۷	۰,۳۵	۹۷	−۰,۲٤
۹۸	۱	۱	۷۵	۱۰۰	۷۵	۲۰۰۵	−۰,۲۷	۹۸	۰,۳۵	۹۸	−۰,۲٤

در این پژوهش با توجه به پژوهش جانتز[1] و همکاران (۲۰۱٤)، از بین سنجه‌های تولیدشده توسط مدل SLEUTH-3r در مرحله کالیبراسیون، سنجه‌های تفاوت کسری Cluster, Edge و Area استفاده شد. نتایج سنجه‌های کنترل تولیدشده در مرحله کالیبراسیون با خطای (± ۱۰ درصد) در نظر گرفته شدند تا از اعتبار بیشتری برخوردار باشند. نتایج نهایی سنجه‌های انتخاب‌شده در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر سنجه‌های کنترل برای سناریوها به تفکیک زیرمناطق

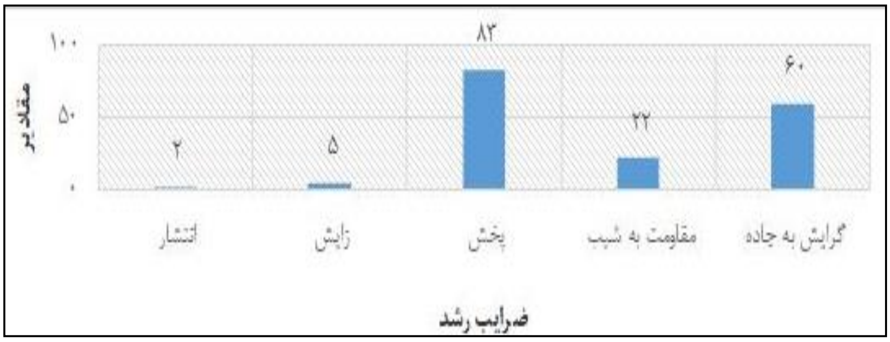
مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

Calibration metrics		
AFD[2]	EFD[3]	CFD[4]
0.042	-0.067	-0.07

ضرایب حاصل از کالیبراسیون شهر زاهدان نشان می‌دهد که ضریب پخش با مقدار ۸۳ بیشترین مقدار را دارد. زیادبودن مقدار این ضریب نشان می‌دهد که رشد شهر به‌صورت

1. Jantz
2. AFD (Area Fractional Difference)
3. EFD (Edges Fractional Difference)
4. CFD (Cluster Fractional Difference)

ارگانیک و خودبه‌خودی است؛ به عبارت دیگر، از سال ۱۳۷۰ به‌عنوان سال پایه کالیبراسیون تا سال ۱٤۰۰ که سال اتمام کالیبراسیون است، رشد شهر بیشتر به‌صورت رشد از لبه و رشد ارگانیک بوده است. این نوع رشد به رشد ذاتی شهرها مربوط است و معمولاً در داخل شهر و حاشیه آن رخ می‌دهد و مناطقی که هنوز ساخته نشده‌اند، به کاربری شهری تغییر پیدا می‌کنند. این رشد به شبیه‌سازی رشد لبه‌ای در کناره‌های مراکز جدید شهرشده یا در لبه مراکز شهری موجود می‌پردازد. این نوع رشد زیرِ کنترل ضریب پخش است. ضریب پخش، احتمال اینکه هر سلول غیرشهری با حداقل سه همسایه شهری به تولید یک سلول شهری اضافه در محل‌هایی که شیب مناسب دارند، منجر می‌شود. ضریب گرایش به جاده که با مقدار ٦۰ است و در رده دوم قرار دارد، بیانگر تأثیر جاده‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقلی بر رشد و توسعه شهر و ساخت‌وسازهای جدید است. ضریب رده سوم با مقدار ۲۲، ضریب مقاومت به شیب است. ضریب شیب به شکل دوگانه‌ای برخورد می‌کند. چنانچه ضریب مقاومت شیب بالا و نزدیک به ۱۰۰ باشد، احتمال اینکه پیکسل بررسی‌شده به شهر تبدیل شود، کم است و درصورتی‌که مقاومت شیب پایین باشد، شیب تأثیر زیادی بر مناطق با شیب بیشتر بر گسترش شهر ندارد. ضریب شیب که مقدار کمی دارد، بیانگر این است که شیب زمین بر رشد شهر زاهدان از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ تأثیر چندانی نداشته است.

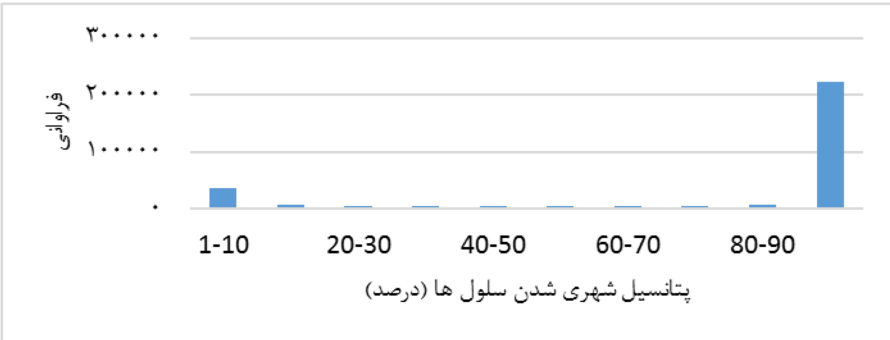


شکل ۵. ضرایب رشد حاصل از فرایند کالیبراسیون داده‌های شهر زاهدان

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

ضریب زایش ضریب با مقدار ۵، در رتبه چهارم از نظر تأثیر بر رشد شهر زاهدان قرار دارد. با توجه به تعریف این ضریب، احتمال اینکه پیکسل شهرشده طی رشد خودبه‌خودی، مرکز جدید توسعه را تعیین می‌کند و بر شکل رشد متاثر از جاده نیز تأثیر می‌گذارد، این ضریب تأثیر بسیار کمی بر رشد شهر زاهدان داشته است؛ به عبارت دیگر، رشد از طریق مراکز جدید در روند رشد زاهدان بسیار کم اتفاق افتاده است. آخرین ضریب که تقریباً بر فرایند رشد شهر تأثیر نداشته است، ضریب انتشار با مقدار ۲ است. این ضریب شکل رشد خودبه‌خودی را هدایت می‌کند (ضریب انتشار تعداد دفعاتی را کنترل می‌کند که یک پیکسل به‌طور تصادفی به‌عنوان پیکسل قابل‌شهرسازی در رشد خودبه‌خودی، انتخاب خواهد شد). براساس مقدار کم این ضریب، رشد خودبه‌خودی در روند رشد شهر زاهدان کمترین سهم را دارد. براساس مقادیر ضرایب حاصل از کالیبراسیون منطقه پژوهش، الگوهای رشد ذاتی یا ارگانیک و الگوی رشد گرایش به جاده، بیشترین تطابق را دارند و براساس نتایج کالیبراسیون می‌توان این‌گونه اظهارنظر کرد که رشد شهر زاهدان از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ براساس رشد ارگانیک و رشد تحت‌تأثیر جاده و شبکه‌های حمل‌ونقل اتفاق افتاده است. در این پژوهش برای اعتبارسنجی خروجی‌های مدل به‌منظور اطمینان به نتایج کالیبراسیون، برای پیش‌بینی رشد آتی از اعتبارسنجی نقشه‌های تولیدشده به‌صورت فضایی، پیش‌بینی آزمایشی گذشته تا حال از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ اجرا شد. سپس خروجی تولیدشده در این مرحله، با نقشه واقعی سال ۱٤۰۰ به‌وسیله روش کاپا اعتبارسنجی شد. پیش‌بینی آزمایشی مدل از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ براساس ضرایب حاصل از کالیبراسیون مدل SLEUTH برای شهر زاهدان انجام گرفت. با توجه به اینکه رشد شهر متأثر از عوامل متعددی است که طیف وسیعی از عوامل فضایی و اجتماعی و... را در بر می‌گیرد، این نکته باید مدنظر قرار گیرد که شبیه‌سازی انجام‌شده تمام واقعیت را ارائه نمی‌دهد؛ به‌عبارت‌دیگر، خروجی‌های مدل عین واقعیت انجام‌شده در رشد شهر زاهدان نیست؛ بلکه نتیجه عواملی مانند شیب و تأثیر شبکه حمل‌ونقل و عوامل فیزیکی است که در این مدل گنجانده شده است. نتایج شبیه‌سازی رشد گذشته تا حال شهر زاهدان براساس شکل ۷ است. خروجی نتایج شبیه‌سازی، به‌صورت یک فایل تجمعی شامل پتانسیل سلول‌ها برای شهرنشینی از صفر تا ۱۰۰ در یک فایل تجمعی نهایی با

فرمت رستر ذخیره می‌شود. همچنین برای هر دوره شبیه‌سازی به‌صورت سالانه مقدار رشد هرسال در فایل‌های رستری به نام همان سال‌ها ذخیره می‌شود. نمودار فراوانی سلول‌های پیش‌بینی‌شده در فایل تجمعی نهایی پیش‌بینی، براساس پتانسیل شهری شدن از عدد ۱–۱۰۰ (سلول‌های دارای مقدار صفر به‌دلیل قطعیت در عدم شهری بودن از محاسبات حذف می‌شود)، نشان می‌دهد که با فرض پتانسیل شهری‌شدن بالا برای خروجی مدل، بیشترین فراوانی مربوط به بازه ۹۰–۱۰۰ است. براساس بررسی یافته‌های پژوهش اسفنده و همکاران (۱٤۰۰)، اگر قرار است بازه‌ای از سلول‌های دارای پتانسیل شهری شدن برای تبدیل به سلول‌های شهری انتخاب شود، مناسب‌ترین بازه، ۹۰–۱۰۰ درصد است. براساس این تحلیل، فایل تجمعی نهایی شبیه‌سازی‌شده وارد نرم‌افزار GIS شد و سلول‌های دارای پتانسیل شهری شدن ۹۰ درصد و بیشتر، سلول‌های شهرشده در نظر گرفته شدند.



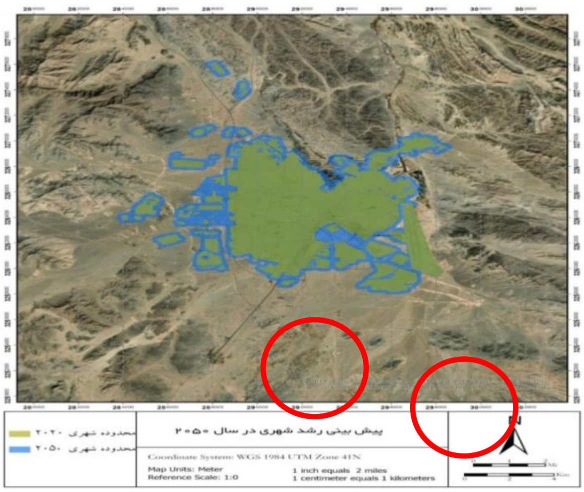
شکل ٦. فراوانی سلول‌های دارای پتانسیل شهری در شبیه‌سازی گذشته تا حال (به درصد)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

برای اعتبارسنجی خروجی مدل، از روش ضریب کاپا استفاده شد. در اعتبارسنجی به روش کاپا، نقشه شهری باینری سال ۱٤۰۰ به‌عنوان مرجع انتخاب شد. سپس خروجی شبیه‌سازی به‌صورت باینری شهر/غیرشهر تهیه شد. برای اعتبارسنجی به روش کاپا هر دو نقشه وارد نرم‌افزار ENVI که دارای این قابلیت است شد و ضریب کاپای محاسبه‌شده، مطابقت ۹۵ درصدی نتایج شبیه‌سازی با واقعیت را نشان داد. این عدد نشان می‌دهد که رشد

شهر زاهدان تنها براساس عوامل فیزیکی نبوده است؛ بلکه ٤٠ درصد باقی‌مانده عوامل اجتماعی و اقتصادی و... هستند که رشد و الگوی رشد شهر را از سال ۱۹۹۰ تاکنون تحت‌تأثیر قرار داده‌اند؛ البته در تحلیل این عدد فقط به درصد موفقیت‌آمیز ٦٠ نمی‌توان بسنده کرد؛ زیرا الگو و شکل گسترش شهر در طی زمان نیز می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را بیشتر به عوامل غیرفیزیکی سوق دهد. پس از تنظیم ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله کالیبراسیون، بخش پیش‌بینی مدل اجرا می‌شود. در آن مرحله، تعداد تکرار مونت‌کارلو باید زیاد در نظر گرفته شود. در این تحقیق به‌منظور پیش‌بینی تعداد تکرار مونت‌کارلو برابر با ۱۰۰، به‌دلیل حداکثر تکرار و محاسبه، بیشترین حد صحت پیش‌بینی در نظر گرفته شد. نتایج اجرای پیش‌بینی، تولید تصاویر با فرمت GIF برای هر یک از سال‌های مدت پیش‌بینی است. در این تحقیق بازه زمانی سی‌ساله از ١٤٠٠ تا ١٤٣٠ مدنظر است. هریک از تصاویر خروجی دارای مقادیری است که نشان‌دهنده احتمال شهر شدن آن در سال مدنظر است که پس از ورود تصاویر به محیط GIS پیکسل‌های با احتمال بیش از ۷۰ درصد به‌عنوان مناطق شهری در نظر گرفته شد و به کمک تابع باز طبقه‌بندی، نقشه مناطق شهری در سال‌های مدنظر تهیه شد. براساس نتایج پیش‌بینی رشد شهری زاهدان تا افق سال ١٤٣٠، شاهد رشد مناطق شهری اغلب به‌صورتی لبه‌ای خواهیم بود؛ بدین صورت که رشد آتی شهر در کناره‌های بافت موجود شکل می‌گیرد. رشد شهری زاهدان در درجه اول به‌صورت درونی خواهد بود؛ یعنی ابتدا اراضی بایر و ذخیره شهری داخل محدوده مصوب رشد خواهند داشت و بعد از پرشدن این اراضی، رشد شهر از لبه‌های شهر اتفاق می‌افتد. اما این روند رشد از لبه در همه مناطق به یک شکل اتفاق نمی‌افتد و برخی از مناطق به‌خصوص دو محدوده مشخص‌شده در شکل ۷، رشد بیشتری را متحمل می‌شوند. ازآنجاکه عمده رشد حاشیه‌نشینی زاهدان در قسمت شمال شرقی و شرق آن حتی از خارج از حریم شهر بوده است، رشد دومنطقه مشخص‌شده در غرب و جنوب غربی شهر، نشانگر مطلوبیت زیاد این مناطق برای رشد آتی خواهد بود و زمین‌های قابل‌سکونت در قسمت‌های حاشیه‌نشین رو به اتمام خواهد بود؛ یعنی رشد مناطق مذکور می‌تواند به‌صورت کاملاً برنامه‌ریزی‌شده طراحی شود. الگوی رشد شهر زاهدان نیز تا افق سال ١٤٠٠ تمایل به حفظ شکل فعلی شهر داشت. برخلاف الگوی رشد شهر بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ١٤٠٠ که

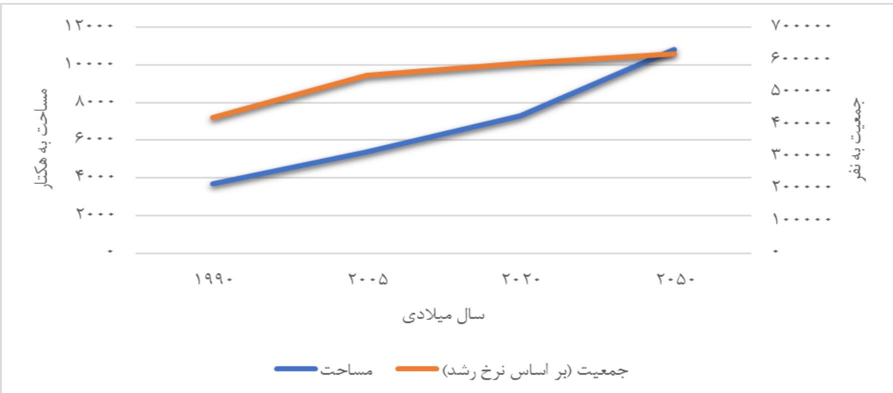
عمدتاً در غرب شهر شاهد ایجاد لکه‌های شهری به‌صورت پراکنده در غالب سیاست‌های شهرک‌سازی‌های گسترده آن دهه بوده‌ایم، رشد شهری تا افق سال ۱٤۳۰ رشد خودبخودی و پراکنده‌ای نخواهد داشت و عمدتاً از الگوی وضع موجود و به‌صورت لبه‌ای در غالب الحاق شهرک‌های غدیر و جهاد به مناطق ۲ و ۱ شهر زاهدان پیروی خواهد کرد. همچنین با در نظر گرفتن اینکه مطلوبیت توسعه اراضی در نیمه‌غربی شهر بیشتر از نیمه‌شرقی آن است، الگو و میزان رشد ۱٤۰۰ منطقی‌تر و مناسب‌تر می‌نماید. با توجه به اینکه بیشتر عوامل محدودکننده رشد شهری در قسمت شرقی قرار گرفته‌اند، مانند فردوگاه، مسیل سیلاب‌ها، ارتفاعات با شیب‌های نامناسب و...، تغییر جهت الگوی رشد در افق سال ۱٤۳۰ به سمت غربی و جنوبی نشانگر موفقیت طرح‌های توسعه شهر و برنامه‌ریزان شهری در شکل‌دهی مطلوب به توسعه شهر زاهدان است. عامل مهم شبکه ارتباطی نیز نقش بسیار پررنگی در رشد آینده ایفا می‌کند؛ به‌گونه‌ای‌که حتی به‌صورت بصری نیز می‌توان مشاهده کرد که رشد فیزیکی آتی شهر به سمت رشد متمایل به جاده است و سعی در پرکردن خلأهای بین راه‌ها و بافت موجود دارد؛ به‌طوری‌که حتی کمربندی شهر نتوانسته است مانع این تمایل به رشد متأثر از جاده شود و آن را محدود کند.



شکل ۷. شبیه‌سازی رشد شهری زاهدان تا افق سال ۱٤۳۰

مأخذ: ترسیم توسط نگارندگان، ۱٤۰۱

رشد فیزیکی شهر باید هماهنگی و تناسب با رشد جمعیت داشته باشد و به‌گونه‌ای باید رشد داشته باشد که جواب‌گوی جمعیت اضافه شده باشد. با توجه به شکل ۷، روند رشد مساحت بین سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰ از ۳٦۸٤ هکتار به ۷۲۹۷ هکتار یعنی تقریباً دو برابر شده است. براساس خروجی‌های حاصل از مدل SLEUTH، این رشد مساحت شهر زاهدان تا سال ۱٤۳۰ به مقدار ۱۰۸۱۹ هکتار خواهد رسید که تقریباً ۳۰ درصد در مقایسه با سال ۱٤۰۰ رشد خواهد داشت؛ بنابراین براساس روند رشد مساحت در بازه بررسی‌شده تقریباً روند یکنواختی دارد، اما از نظر رشد جمعیتی، الگوی رشد بعد از سال ۱۳۷۰ با نرخ کمتری رشد داشته است و با توجه به میانگین نرخ رشد جمعیت زاهدان از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰، جمعیت آینده در سال ۱٤۳۰ براساس همین نرخ رشد برابر با ٦۱۸٦٦۳ نفر خواهد بود. از طرفی با توجه افزایش مساحت حدود ۳۰ درصدی در سال ۱٤۳۰، شاهد کاهش تراکم جمعیت در سال ۱٤۳۰ به میزان ۵۷ نفر در هکتار از ۸۹ نفر در هکتار خواهیم بود. این مقدار نشانگر سبقت گرفتن میزان رشد فیزیکی شهر از رشد جمعیتی آن است و به معنی گسترش افقی و کالبدی شهر بیش‌ازحد نیاز شهر زاهدان است.



شکل ۸. نتایج برآورد مساحت و جمعیت شهر زاهدان

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۱

٤. ٢. نتایج امکان‌سنجی جمعیت‌پذیری گسترش شهر زاهدان در افق ١٤٣٠

برآورد جمعیت‌پذیری مناطق رشدیافته در سناریوهای رشد شهری نقش مهمی در برنامه‌ریزی کالبدی و خدماتی آن خواهد داشت. در این پژوهش جمعیت‌پذیری مناطق گسترش‌یافته جدید براساس تراکم جمعیتی ۱۱۳ نفر در هکتار پیشنهادی طرح جامع ابلاغی ۱۳۹۰ انجام شد؛ بدین‌ترتیب، مساحت مناطق رشدیافته جدید براساس تراکم جمعیتی محاسبه شده و از این طریق جمعیت‌پذیری حداقل محاسبه می‌شود:

PoP = A ⁎ Ca

در این رابطه، PoP جمعیت شهر در آینده به نفر، A مساحت جدید اضافه‌شده به شهر به مترمربع، Ca تراکم جمعیتی (نفر در هکتار) است:

A= مساحت سال ١٤٠٠ –مساحت سال ١٤٣٠ = ٣٥٢١/٨٤٧٥

PoP= ٣٥٢١/٨٤٧٥ * ١١٣ = ٣٩٧٩٦٨ نفر

جدول ٦. برآورد جمعیت‌پذیری شهر تا سال ۲۰۵۰ بر اساس تراکم جمعیتی

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٤٠١

برآورد جمعیت نهایی شهر (به نفر)	برآورد جمعیت‌پذیری مساحت اضافه‌شده (به نفر)	برآورد مساحت اضافه‌شده (به هکتار)	برآورد مساحت کل شهر (به هکتار)
٩٨٥٦٩٨	٣٩٧٩٦٨	٣٥٢١,٨٤٧٥	١٠٨١٩,٦٤٧٥

با توجه به جدول ٦، مساحت اضافه‌شده به شهر زاهدان در سال ١٤٣٠ برابر با ٣٥٢١ هکتار خواهد بود که اضافه شدن این مقدار مساحت به شهر، قابلیت جمعیت‌پذیری ٣٩٧٩٦٨ نفری را خواهد داشت؛ بر این اساس، جمعیت پذیری نهایی شهر زاهدان در افق سال پیش‌بینی برابر با ٩٨٥٦٩٨ نفر خواهد بود. این مقدار در مقایسه با برآورد رشد جمعیت براساس میانگین نرخ رشد جمعیت، حدود ٣٠٠ هزار نفر بیشتر است؛ یعنی میزان مساحت اضافه‌شده به شهر زاهدان تا افق سال ١٤٣٠ کاملاً جواب‌گوی افزایش جمعیت و ساکنان خواهد بود و هیچ نیازی به توسعه محدوده‌های جدید نخواهد بود. با توجه پیش‌بینی‌ها و خروجی‌های این مطالعه، تراکم جمعیتی ١١٣ نفر در هکتار مدنظر طرح جامع شهر زاهدان

برای افق سال ۱٤۳۰ بسیار رقم بزرگ‌تری در مقایسه با جمعیت‌پذیری و رشد جمعیتی شهر دارد و می‌توان بیان کرد که این مقدار باعث پراکنده‌رویی و رشد بیش‌ازحد افقی شهر می‌شود. رشد افقی شهرها مشکلات بسیاری مانند هزینه‌های زیاد تأمین خدمات شهری مانند آب آشامیدنی، فاضلاب و حمل‌ونقلی و... دارد و می‌تواند به گسترش افسار گسیخته مناطق حاشیه‌نشین و اسکان غیررسمی نیز دامن بزند؛ بنابراین طبق پیش‌بینی‌های این مطالعه از طریق شبیه‌سازی رشد شهری براساس مطلوبیت اراضی برای توسعه و الگوهای رشد حاصل از مدل SLEUTH-3r، الگوی مناسب توسعه شهری زاهدان، الگوی متراکم و فشرده با الویت توسعه در مناطق درونی محدوده و سپس مناطق غربی و جنوبی بافت موجود است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش حاضر ذکر این نکته را ضروری می‌کند که با توجه به محدودیت‌های تمامی مدل‌ها در مدل‌سازی شهر، مدل SLEUTH نیز محدودیت‌هایی دارد که از آن جمله تعامل ضعیف این مدل در قلمداد کردن عوامل غیرفضایی و ذهنی مانند عوامل فرهنگی و هرگونه عاملی است که نمی‌توان به‌صورت فضایی، مکانی و کمّی تبدیل کرد؛ پس خروجی‌های این مدل و درنتیجه این پژوهش نیز نمی‌تواند بازخورد تمام عوامل مؤثر در رشد شهر را در شبیه‌سازی رشد آینده شهر دخالت دهد و واقعیتی قطعی از رشد آینده ارائه کند، اما در این پژوهش برای کاستن از محدودیت‌های مدل روش شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر رشد شهر زاهدان به دخالت عوامل مؤثر در رشد آینده شهر از دیدگاه‌های مختلف پرداخته شده است.

الگوی شهر زاهدان براساس نتایج کالیبراسیون مدل رشد، متأثر از شبکه حمل‌ونقل و رشد ارگانیک است که در شبیه‌سازی‌های رشد آینده نیز همین الگوهای رشد بیشتر نمایان هستند. پیش‌بینی‌های مدل‌سازی برای سال ۱٤۳۰ نشان داد که با وجود درصد رشد شهری در سال‌های بین ۱۳۷۰ تا ۱٤۰۰، در افق پیش‌بینی از سرعت رشد فیزیکی شهری کاسته می‌شود. یکی از موارد مؤثر بر این موضوع، در نظر گرفتن محدودیت‌ها و عوامل مؤثر بر رشد شهری زاهدان به‌طور منحصربه‌فرد است؛ زیرا عمده پیش‌بینی‌ها به‌صورت بسیار ساده از نتیجه برآورد

حداقل زمین موردنیاز طبق سرانه است، اما این مطالعه، با در نظر گرفتن نقش عوامل مهم و تأثیرگذار بر رشد منحصربه‌فرد زاهدان و تحلیل نرم‌افزاری و دریافت نظرات کارشناسان از طریق روش AHP، توانسته است الگو و میزان واقع گرایانه‌تری را از رشد آتی شهر زاهدان ارائه کند. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، اراضی غربی شهر پتانسیل و مطلوبیت بیشتری برای توسعه داشتند که درعمل نیز نتایج پیش‌بینی مدل برای سال ۱۴۳۰ بر این موضوع تاکید دارد؛ بنابراین الگو و میزان رشد شهر زاهدان بیانگر تأثیرپذیری از عوامل استفاده‌شده در این مطالعه بوده است. با توجه به اینکه اقلیم و جغرافیای شهر زاهدان خشک و بیابانی است، گسترش شهری پیش‌بینی‌شده در این مطالعه نشان داد که این رشد به محیط‌زیست و اکولوژی طبیعی شهر آسیب نمی‌رساند و عمده اراضی بایر اطراف شهر به کاربری شهری تبدیل می‌شوند، اما در برخی مناطق مانند مناطق شرقی، الگو و میزان رشد باعث گسترش شهر در مناطق نامناسب از نظر شیب و ارتفاع و مسیل‌های سیل‌گیر می‌شود که تأمین خدمات شهری را نیز با مشکل مواجه می‌کند. در شهر زاهدان با دو پدیده شهر رسمی و غیررسمی مواجه هستیم. زاهدان شهری است که میزان اسکان غیررسمی و حاشیه‌نشینی در آن بسیار زیاد است و عمده این مناطق در سمت شرقی شهر و حتی خارج از محدوده و حریم شهر گسترش یافته‌اند. علاوه بر این، آمارهای جمعیتی گاه ضدونقیض می‌شود. همین موارد باعث می‌شود تا اثرات رشد شهری برای تحلیل‌هایی که به‌صورت رسمی آماده می‌شوند، همواره با واقعیت مطابق نباشند. در این مطالعه، سعی شد تا درصد تغییرات اراضی شهری و مدل‌سازی رشد آینده فقط به محدوده‌های سیاسی محدود نشود و با در نظر گرفتن محدوده‌ای بزرگ‌تر از حریم شهر بتوان بیشتر سکونتگاه‌های موجود را در نظر گرفت. همان‌گونه که نتایج مدل‌سازی رشد تا افق سال ۱۴۳۰ و محاسبات جمعیت‌پذیری نشان داد، تغییرات رشد شهری و جمعیتی تفاوت فاحشی با یکدیگر دارند که این موضوع به نبود آمار جمعیتی درست از شهر و گسترش بیش از اندازه محدوده‌های غیررسمی مربوط است. درمجموع می‌توان اظهار نظر کرد، با توجه به کارکرد مناسب مدل رشد شهری SLEUTH-3r در کالیبراسیون الگوها و ضرایب رشد شهری، با در نظر گرفتن عوامل مؤثر منحصربه‌فرد در رشد شهر زاهدان و اعتبارسنجی نتایج مدل، از نتایج این تحقیق می‌توان در برنامه‌ریزی‌های آتی شهر زاهدان استفاده کرد.

براساس یافته‌های این پژوهش و مقایسه با مطالعه گلاستر[1] و همکاران (۲۰۱۸)، پراکندگی به‌عنوان یک فرایند بدون در نظر گرفتن الگو نمی‌تواند مشخص شود. آریا و کابرال (۲۰۱۹) چنین نرخ رشد زیادی در منطقه موردمطالعه خود را بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ گزارش دادند. این نکته بیان می‌کند که افزایش ساخت می‌تواند به‌عنوان کاهش زمین‌های طبیعی در حاشیه شهرها تعبیر شود. این مطالعه با استفاده از مدل SLEUTH-3R که نسخه بهبودیافته مدل (SLEUTH)، یکی از انواع مدل‌های سلول‌های خودکار است، انجام شد؛ بنابراین این پژوهش از نظر شیوه اجرا و نوع مدل استفاده‌شده، با تمام مطالعات در کشور متفاوت است، اما با مطالعات خارج از کشور یعنی ساکسنا و جات[2] (۲۰۱۹)، آگیمانگ[3] و همکاران (۲۰۱۹)، لی و همکاران (۲۰۱۸) و مارتلوزو[4] و همکاران (۲۰۱۸) یکسان است. همچنین این پژوهش در یکی از نواحی ساحلی کشور انجام شد که با مناطق مطالعاتی بررسی‌شده در مطالعات سلمان ماهینی و کریمی (۲۰۱۱)، ماهینی و غلامعلی‌فرد (۲۰۰۷)، مؤمنی (۱۳۸۹)، رفیعی (۱۳۸٦)، رسولی و همکاران (۱۳۹۵)، جعفرنژاد و ماهینی (۱۳۹٤)، ساکیه[5] و همکاران (۲۰۱۵)، بی‌همتا و همکاران (۲۰۱۵)، کلارک و ماهینی (۲۰۱۳) و داداش‌پور و همکاران (۲۰۱۹) متفاوت است. ضرایب حاصل از کالیبراسیون شهر زاهدان نشان می‌دهد، ضریب پخش با مقدار ۸۳ بیشترین مقدار را دارد. ضریب گرایش به جاده با مقدار ٦۰ است که در رده دوم قرار دارد و بیانگر تأثیر جاده‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقلی بر رشد و توسعه شهر و ساخت‌وسازهای جدید است. ضریب رده سوم با مقدار ۲۲ ضریب مقاومت به شیب است. ضریب زایش ضریب با مقدار ۵، در رتبه چهارم از نظر تأثیر بر رشد شهر زاهدان قرار دارد. آخرین ضریب که تقریباً در فرایند رشد شهر تأثیری چندانی بر شهر زاهدان ندارد، ضریب انتشار با مقدار ۲ است. کالیبراسیون مدل نشان می‌دهد که مهم‌ترین نیروی محرکه رشد شهری در منطقه موردمطالعه ضرایب پخش، جاذبه جاده و مقاومت به شیب هستند؛ به‌نحوی‌که رشد شهری بیشتر از طریق توسعه اراضی رهاشده درون‌شهری و همچنین در حاشیه‌ها، تحت‌تأثیر

1. Gloster
2. Saxena & Jat
3. Agyemang
4. Martellozzo
5 . Sakieh

شبکه حمل‌ونقل صورت می‌گیرد، اما این توسعه تا حد زیادی متأثر از ویژگی‌های توپوگرافی منطقه کنترل می‌شود. ضرایب دیگر شامل ضریب زایش و انتشار، نقش کمتری در روند کلی رشد شهر زاهدان دارند؛ یعنی توسعه خوشه‌های جدید شهری در مناطقی که زیرساخت‌های شهرسازی وجود ندارد، با احتمال بیشتری پخش خواهد شد و رشد شهر توسط عوامل طبیعی مانند شیب، ارتفاع و عوامل انسان‌ساخت همچون جاده‌ها نظم داده می‌شود. با در نظر گرفتن سایر کاربردهای مدل SLEUTH در ایران (مشهد، گرگان، علی‌آباد، اصفهان، تبریز و کرج) می‌توان گفت که ضرایب تعیین‌کننده انواع الگوهای رشد شهری در این مطالعات دارای مقادیر تفاوت هستند؛ این امر به‌دلیل قابلیت زیاد مدل SLEUTH در قسمت‌ها و منطقه‌های مختلف است که موجب شده است مقادیر این ضرایب، منعکس‌کننده خصوصیات محلی منطقه موردمطالعه باشد.

با توجه به اینکه توسعه شهری فرایندی سیستمی و پیچیده است و به عوامل زیاد و مختلفی ارتباط دارد، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به‌منظور پیش‌بینی و شبیه‌سازی هوشمندتر و کم‌خطا از رشد شهری با در نظر گرفتن مؤلفه‌های متعدد در مدل‌سازی، سناریوهای مختلف تأثیر بر محیط‌زیست، اقتصادی–اجتماعی تهیه و آزمون شوند. درنهایت پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آتی، به‌منظور به دست آوردن نتایج دقیق و درست از مکانیسم رشد چندزمانی–تاریخی و سناریوهای پیش‌بینی رشد کالبدی–فیزیکی در دنیای واقعی، به استفاده از قوانین خوداصلاحی مدل SLEUTH-3r توجه بیشتری شود.

کتابنامه

۱. ابراهیم زاده، ع.، بریمانی، ف.، و نصیری، ی. (۱۳۸۳). حاشیه نشینی، ناهنجاری‌های شهری و راهکارهای تعدیل آن موردشناسی، کریم‌آباد زاهدان. *جغرافیا و توسعه*، ۲، ۱۲۱–۱۴۳.
۲. اسفنده، س.، دانه‌کار، ا.، و سلمان‌ماهینی، ع. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی و پیش‌بینی الگوی رشد شهری تا سال ۲۰۵۰ با استفاده از مدل SLEUTH-3R (مطالعه موردی: ناحیه ساحلی شهرستان پارسیان). *مجله محیط شناسی*، *۴۷*(۱)، ۵۳–۷۲.
۳. جمشیدزهی شه‌بخش، ا.، و قنبری، س. (۱۳۹۹). خزش شهری و تحولات کالبدی ــ فضایی سکونتگاه‌های پیراشهر زاهدان. *مجله توسعه فضاهای پیراشهری*، ۲(۱)، ۸۵–۱۰۴.

٤. رسولی، م.، سلمان‌ماهینی، ع.، و کامیاب، ح. ر. (۱۳۹۵). تعیین ضرایب مؤثر بر رشد شهری در مدل SLEUTH برای شهرستان‌های علی‌آباد، رامیان و آزادشهر. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۲۱(٦)، ۱-۱۲.

۵. ساکیه، ی. (۱۳۹٤). *تعیین محورهای توسعه پایدار شهر کرج بر اساس شبیه‌سازی توسعه شهر و توان محیط‌زیست* (پایان نامه کارشناسی ارشد گروه محیط زیست). دانشگاه تهران، تهران، ایران.

٦. کامیاب، ح.، و سلمان ماهینی، ع. (۱۳۹۷). *مقدمه‌ای بر مدل‌سازی توسعه شهری و کاربردهای آن (چاپ اول)*. گرگان: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۷. کریمی، م. (۱۳۹۱). *درسنامه سامانه‌های پشتیبان برنامه‌ریزی مکانی*. دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

۸. مبرقعی، ن. (۱۳۸۹). لزوم تحقق مدیریت یکپارچه محیط زیست شهری. *نخستین همایش توسعه شهری پایدار*، ۲ آذر، تهران.

۹. مهدی‌زاده، ح.، و جمور، ی. (۱۳۹۷). مطالعه امکان‌سنجی جایگزینی ترازیابی دقیق با GPS/Levelling در منطقه ایران. *نشریه علمی-پژوهشی علوم زمین*، ۲۷(۱۰۷)، ۱۸۵-۱۹۲.

۱۰. مؤمنی، ا. (۱۳۸۹). *مدل‌سازی رشد شهری شهر تهران تا سال ۲۰۱۰ با استفاده از مدل SLEUTH*. تهران: مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.

11. Agyemang, F. S. K., Silva, E., Poku-Boansi, M., Kamuzu, F., Silva, E., & Poku-Boansi, M. (2019). Understanding the urban spatial structure of Sub-Saharan African cities using the case of urban development patterns of a Ghanaian city-region. *Habitat International*, *85*, 21-33.
12. Akın, A., Clarke, K. C., & Berberoglu, S., (2014). The impact of historical exclusion on the calibration of the SLEUTH urban growth model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *27*, 156-168.
13. Al-shalabi, M., Billa, L., Pradhan, B., Mansor, S., & Al-Sharif, A. A. (2013). Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: the case of Sana’a metropolitan city, Yemen. *Environmental Earth Sciences*, *70*(1), 425-437.
14. Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavalle, C., (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, *64*(3), 145-160.
15. Bihamta, N., Soffianian, A., Fakheran, S., & Gholamalifard, M. (2015). Using the SLEUTH Urban Growth Model to Simulate Future Urban Expansion of the Isfahan Metropolitan Area, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *43*(2), 407–414.

16. Clarke, K. C., & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*: *IJGIS*, *12*(7), 699–714.
17. Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *24*(2), 247–261.
18. Cohen, B. (2006). Urbanization in developing countries: Current trends, future projections, and key challenges for sustainability. *Technology in Society*, *28*, 63-80.
19. Dadashpoor, H., Azizi, P., & Moghadasi, M. (2019). Analyzing spatial patterns, driving forces and predicting future growth scenarios for supporting sustainable urban growth: Evidence from Tabriz metropolitan area, Iran. *Sustainable Cities and Society*, *47*, 101502.
20. Jantz, C., Drzyzga, S., & Maret, M. (2014). Calibrating and Validating a Simulation Model to Identify Drivers of Urban Land Cover Change in the Baltimore, MD Metropolitan Region. *Land*, *3*, 1158-1179.
21. Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2001). Assessing the demand of solid waste disposal in urban region by urban dynamics modeling in a GIS environment. *Resources, Conservation and Recycling*, *33*(4), 289-313.
22. Leao, S., Bishop, I., & Evans, D. (2004). Simulating urban growth in a developing nation's region using a cellular automata-based model. *Journal of Urban Planning and Development*, *130*(3), 145-158.
23. Li, F., Wang, L., Chen, Z., Clarke, K. C., Li, M., & Jiang, P. (2018). Extending the SLEUTH model to integrate habitat qual1ity into urban growth simulation. *Journal of Environmental Management*, *217*, 486-498.
24. Mahini, A. S., Gholamalifard, M. (2007). Dynamic spatial modeling of urban growth through cellular automata in a GIS environment. *International Journal of Environmental Research (IJER)*, *1*(3), 272–279.
25. Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., Feghhi, J., & Dezhkam, S. (2015). Simulating urban expansion and scenario prediction using a cellular automata urban growth model SLEUTH, through a case study of Karaj City, *Iran. Journal of Housing and the Built Environment*, *30*(4), 591–611.
26. Sakieh, Y., Salman Mahiny, A., Jafarnezhad, J., Mehri, A., Kamyab, H., & Galdavi, S. (2015). Evaluating the strategy of decentralized urban land-use planning in a developing region. *Land Use Policy*, *48*, 534–551.
27. Saxena, A., & Jat, M. K. (2019). Capturing heterogeneous urban growth using SLEUTH model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *13*, 426–434.
28. Saxena, A., & Jat, M. K. (2020). Land suitability and urban growth modeling: Development of SLEUTH Suitability. *Computers, Environment and Urban Systems*, *81*, 101475.

29. United Nations. (2020). *Population Division. World urbanization prospects, the 2021 revision*. Department of Economic and Social Affairs/Population Division. New York.
30. Wang, H., He, S., Liu, X., Dai, L., Pan, P., Hong, S. and Zhang, W. (2013). Simulating urban expansion using a cloud-based cellular automata model: A case study of Jiangxia, Wuhan, China. *Landscape and urban planning*, *110*, pp.99-112.
31. Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, *311*(5985), 419–424.
32. Wu, X., Hu, Y., He, H.S., Bu, R., Onsted, J., & Xi, F., (2009). Performance evaluation of the SLEUTH model in the Shenyang metropolitan area of northeastern China. *Environmental Modeling & Assessment*, *14*(2), pp.221-230.
33. Yang, X., & Lo, C. P. (2003). Modelling urban growth and landscape changes in the Atlanta metropolitan area. *International Journal of Geographical Information Science*, *17*(5), 463-488.
34. Zhou, X., Wang, Y., & Sangawongse, S. (2009). Prediction urbanization process using SLEUTH and its temporal accuracy evaluation. *Proc., ESRI Asia Pacific User Conference*, ESRI Australia, Brisbane, Australia.